



TITLE:

# Fluctuations and non-equilibrium phenomena in strongly-correlated ultracold atoms( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Nagao, Kazuma

---

CITATION:

Nagao, Kazuma. Fluctuations and non-equilibrium phenomena in strongly-correlated ultracold atoms. 京都大学, 2019, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21550>

RIGHT:

許諾条件により本文は2019-06-01に公開; 許諾条件により要旨は2019-04-01に公開

( 続紙 1 )

京都大学	博 士（理 学）	氏名	長尾 一馬
論文題目	Fluctuations and non-equilibrium phenomena in strongly-correlated ultracold atoms (強相関極低温冷却原子における揺らぎと非平衡現象)		
(論文内容の要旨)			
<p>光格子中に閉じ込められた冷却原子気体は、系のパラメータなどの高い制御性から、古典計算機の代わりによくコントロールされた実験系を用いて量子系をシミュレートする「量子シミュレータ」の理想的なプラットフォームとして期待されている。特に、冷却原子が外界からの擾乱を受けない断熱系であり、従来の固体物性系に比べて比較的長い緩和時間を持つことは、非平衡の物理を研究する上でも好ましい。本学位論文において長尾氏は、光格子中の強く相互作用する冷却ボーズ気体の物理、特に（１）３次元光格子中のHiggsモード（振幅モード）に対するゆらぎ、およびトラップポテンシャルに起因する非一様性の効果、（２）光格子中のボーズ気体のクエンチダイナミクス、について詳細に研究した。論文は、研究の背景や使用される手法について解説する第１－３章と、本論文のオリジナルな結果である公表論文１、２の内容を述べた第４章、第５章、および結論の第６章から成る。</p> <p>第４章では、第２章での冷却原子におけるHiggsモードの簡単なレビューに引き続いて、３次元光格子の場合について詳細な考察が加えられている。具体的には、冷却原子の実験においてHiggsモードを励起する方法のひとつとして、ホッピングの強さを時間的に変調させる方法があるが、これに対応する応答関数を理論的に考察している。まず、出発点となるボゾンの占有数（たとえば１格子点あたり１個）のまわりの有限個のゆらぎを考慮することで有効スピンモデルを導き、その平均場解からのゆらぎをスピン波のHolstein-Primakoff展開と同様の精神で系統的に取り入れた。線形応答の範囲内では、ホッピング強度の変調に対する系の応答は、運動エネルギー-運動エネルギーの相関関数から得られるので、ファインマン・ダイアグラムを用いた標準的な有限温度の摂動計算によりこれを求めた。その結果、２次元系とは異なり、一様な３次元系では、有限温度でもHiggsモードに対応する鋭い共鳴ピークが得られ３次元光格子中では、Higgsモードが実験的に観測可能であることが示唆される。いっぽう、現実には原子の閉じ込めに用いられる非一様なポテンシャルが存在するので、その効果も検討する必要がある。この点を調べるため非一様性の効果を局所密度近似の枠内で取り入れた結果、系全体を変調するような摂動に対しては、密度が平均占有率から大きくずれる領域からのゆらぎの効果が効いて共鳴ピークが消滅してしまうことがわかった。これに対し、閉じ込めポテンシャルの中心近傍のみを変調するような摂動に対しては、共鳴ピークが比較的安定に存在できることがわかった。</p> <p>第５章では、系のパラメータを急激に変化させるクエンチの後の、各種物理量の緩和過程や、相関の伝搬について調べた。量子シミュレータの実装のためには、信頼できる理論計算との比較によるベンチマークテストが必要であるが、時間依存密度行列くりこみ群法が使える一次元などを除けば、クエンチダイナミクスに対する信頼できる理論手法は限られていた。そこで、長尾氏は「切断ウィグナー近似（truncated Wigner approximation）」を用いることで、各種物理量の時間変化を調べた。この近似の特徴は、初期状態におけるウィグナー分布がわかると、物理量の時間変化は適当な初</p>			

期状態からの古典的な時間発展を用いて計算される点にある。まず、3次元光格子中のボーズ冷却原子を記述するボーズ・ハバード模型に対して、切断ウィグナー近似を用いて運動エネルギーおよび相互作用エネルギーの緩和過程を調べ、京大の量子光学グループの実験結果との比較を行った。具体的には、系の初期状態をMott絶縁相にセットした後で相互作用を超流動相に対応する点まで急激に弱めて、その後の緩和ダイナミクスを調べた。その結果、少なくともあるタイムスケールまでは特別なフィッティングなしでも実験データをよく再現する結果が得られた。次に、2次元のボーズ・ハバード模型に対し非常に速いクエンチ過程を想定し、ボーズ凝縮状態とMott絶縁状態の2つの異なる初期状態から出発して、超流動相に対応するハミルトニアンで時間発展させた場合の密度-密度相関関数の時間発展の様子を調べた。その結果、「距離」の定義に通常のエウクリッド距離を採用すると、Lieb-Robinson boundを満たす相関の伝搬が観測されることがわかった。また、相関の伝搬速度の相互作用依存性を調べると、ボーズ凝縮状態から出発した場合は相互作用に敏感に依存するのに対し、Mott絶縁状態から出発した場合には相互作用にあまり依存しないこともわかった。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

光格子中の冷却原子気体のダイナミクスの問題は、さまざまな理論的な予言の理想的な実験環境下での検証という観点のみならず、古典計算機の代わりによく制御された実験系を用いて量子多体系の物理をシミュレートする「量子シミュレータ」の実装への基礎づくりという意味でも大変興味深い。本学位論文において、長尾氏は(1) 3次元光格子中のボーズ冷却気体におけるHiggsモードに対する量子・熱ゆらぎ、ならびにトラップポテンシャルによる非一様性の効果、(2) 2次元、3次元光格子中のボーズ冷却気体のクエンチダイナミクス、という2つの異なる問題を考察している。(1)の問題に関しては、2次元系に関する限り、実験では明瞭な共鳴ピークが観測されておらず、その後の理論計算でも、2次元ではHiggsモードがゆらぎや非一様性に対して不安定であることが示唆されていた。このため、3次元におけるHiggsモードの安定性を調べることは実験的検証の観点からも重要であるが、第4章の内容はこの点に光を当てるものである。もとの系の状態空間を切断して得られる擬スピン模型に対する摂動計算により、3次元一様系ではHiggsモードはゆらぎに対して安定であり、明瞭な共鳴ピークとして観測可能であるとの結論を得ているが、これは将来的な3次元系におけるHiggsモードの実験的観測にとり重要な結果である。また、非一様性に関して、トラップポテンシャルの中心付近のみに変調を加えれば、非一様系でも明瞭な共鳴ピークを観測可能であることを結論しているが、これも実験的検証のうえで非常に有用な示唆であると思われる。

2次元、3次元における量子多体ダイナミクスの定量的に信頼できる理論手法の開発は、量子シミュレータの実装という観点からも重要であるが、第5章の内容は、この問題における「切断ウィグナー近似」の有効性を検証しようという試みである。長尾氏は、切断ウィグナー近似を具体的にクエンチダイナミクスの問題に適用し、物理量の緩和過程を調べ、既に得られている実験結果とも良い一致を見ている。強相関量子多体ダイナミクスに対する切断ウィグナー近似の有効性の確立には、現在実験グループと共同で進行中の強相関領域での研究の結果を待たねばならないが、本論文で述べられている結果でも既にその有効性を十分に期待させるものである。以上の理由から、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月11日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2019年 4月 1日以降